

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА ГАЗОТУРБІННОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

© Васи́лів Р.К., 2004

Наведено математичну модель стартер-генератора газотурбінної електроенергетичної установки на базі явнополюсного синхронного генератора з безконтактним тиристорним збуджувачем. Модель дає змогу простежити за поведінкою стартер-генератора під час його роботи у характерних для практики режимах, з врахуванням найважливіших чинників, що впливають на електромагнітні процеси.

Resulted mathematical model of starter-generator of the gas-turbine electroenergy setting on the base of salient pole generator with a noncontact thyristors exciter. A model enables to trace the conduct of starter-generator at his work in typical for practice regimes, taking into account major factors which influence on electromagnetic processes

Постановка проблеми. У електроенергетичних системах газокompресорних станцій (ГКС) з газотурбінним приводом потужністю 4–30 МВт часто практикується застосування синхронних генераторів потужністю 100–300 кВт для живлення споживачів власних потреб. Такі генератори приводяться в рух газовою турбіною, яка у момент ввімкнення збудження генератора має обертатися з визначеною номінальною швидкістю. Для запуску газової турбіни необхідно мати відповідний пристрій, яким найчастіше слугує електропривод. Структура подібної електроенергетичної установки може бути істотно спрощена, якщо газову турбіну на стадії її запуску приводити в рух цією ж електричною машиною, яка слугує генератором. Під час запуску газової турбіни генератор має працювати у режимі двигуна. Такий генератор отримав назву стартер-генератора (С-Г).

Однією з важливих вимог, що ставиться до генераторів ГКС, є безконтактність виконання. Оскільки саме безконтактний варіант виконання забезпечує максимальну надійність роботи. Для випадку ГКС цілком прийнятною є система генерування на базі явнополюсного синхронного генератора з безконтактним збуджувачем, яким слугує теж синхронний генератор, що живить обмотку збудження головного генератора через мостовий тиристорний випростовувач.

Задачі досліджень. На цьому етапі дослідження зазначених електроенергетичних установок ставиться за мету вивчення електромагнітних процесів у основному режимі роботи генератора, враховуючи це, що газова турбіна вже запущена і приводить у рух ротор генератора. Для виконання таких досліджень на комп'ютері необхідно розробити математичну модель та відповідний програмний комплекс, що і є предметом статті.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є електромеханічна система, схему силового електричного кола якої зображено на рис. 1. Структурними елементами цієї системи як і схеми є: М-трифазна електрична мережа, яка у математичній моделі може слугувати також активно-індуктивним навантаженням; G – явнополюсний синхронний генератор (ЯСГ); К, А – катодна та анодна вентильні групи тиристорного випростовувача відповідно; F – ЯСГ, що входить до безконтактної системи збудження основного генератора; E – джерело живлення обмотки збудження збуджувача (джерело постійної напруги). Інші позначення на схемі рис. 1 є такими. Літерою ϕ позначено електричні потенціали незалежних вузлів схеми. Літерою i – струми електричних віток схеми.

На схемі і надалі літерами M, G, F, K, A, E у нижніх індексах відповідно позначено належність величин до трифазної електричної мережі, явнополюсного синхронного генератора, явнополюсного синхронного збуджувача, катодної та анодної вентильних груп тиристорного випростовувача,

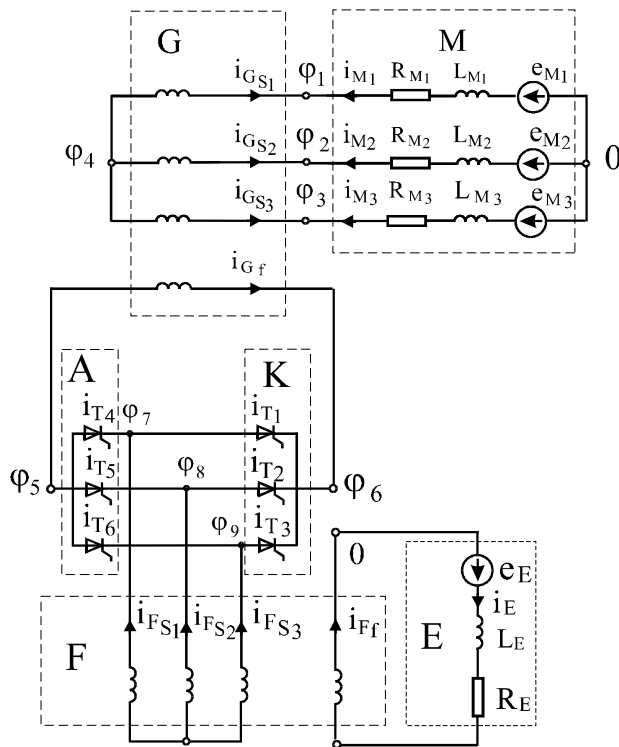


Рис. 1. Схема силового электрического кола стартер-генератора

джерела живлення обмотки збудження збуджувача (джерела постійної напруги). Літерами S, F у нижніх індексах позначено належність відповідних величин до контурів статора та обмотки збудження. Числами у нижніх індексах позначено номери незалежних вузлів схеми та номери електричних віток у межах структурних елементів. Цифрою 0 позначено вузли з нульовим електричним потенціалом.

Математичною моделлю стартер-генератора є система диференціальних рівнянь електричної рівноваги, записана для схеми силового електричного кола, диференціальні рівняння механічної рівноваги, записані для синхронних машин та система логічних рівнянь, що моделює роботу системи керування випростовувача.

Математична модель побудована на засадах теорії математичного моделювання електромашино-вентильних систем [1]. Система рівнянь електричної рівноваги записана, враховуючи наявність готових моделей структурних елементів (блокової структури). У остаточному вигляді система рівнянь електричної рівноваги згідно з [1]

у базисі електричних потенціалів незалежних вузлів має такий вигляд:

$$A \cdot \varphi + B = 0, \quad (1)$$

де

$$A = P_M \cdot \Gamma_M \cdot P_M^t + P_G \cdot \Gamma_G \cdot P_G^t + P_K \cdot \Gamma_K \cdot P_K^t + P_A \cdot \Gamma_A \cdot P_A^t + P_F \cdot \Gamma_F \cdot P_F^t + P_E \cdot \Gamma_E \cdot P_E^t - (2)$$

матриця коефіцієнтів;

$$B = P_M \cdot C_M + P_G \cdot C_G + P_K \cdot C_K + P_A \cdot C_A + P_F \cdot C_F + P_E \cdot C_E \quad (3)$$

– вектор вільних членів;

$$\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8, \varphi_9, \varphi_{10}) \quad (4)$$

– вектор електричних потенціалів незалежних вузлів схеми С-Г.

У рівняннях (2), (3) літерами Γ та C відповідно позначено матриці коефіцієнтів та вектори вільних членів рівнянь зовнішніх віток структурних елементів системи. Літерою P позначено топологічні матриці, що описують з'єднання структурних елементів схеми, а літерою t у верхньому індексі позначено транспонованість матриць.

Матриці інцидентії структурних елементів системи мають таку структуру:

$$P_G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\Pi_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Pi_K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Pi_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Pi_E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матриці коефіцієнтів та вектори вільних членів зовнішніх рівнянь описані у [1]. Оскільки основний генератор і генератор, що слугує збуджувачем, є явнополосними синхронними машинами, то структура матриць коефіцієнтів Γ_G , Γ_F та векторів вільних членів C_G , C_F є абсолютно ідентичною.

Алгоритм роботи системи керування комутатором опишемо системою логічних рівнянь, які мають такий вигляд:

$$w_{T_j} = w_{U_j} \wedge w_{\alpha_j} \wedge w_{K_j} \quad (j = \overline{1,6}), \quad (5)$$

де w_{T_j} – логічна змінна, при істинному значенні якої ($w_{T_j} = \text{true}$) відкривається j -й тиристор і не відкривається при $w_{T_j} = \text{false}$; w_{U_j} – приймає істинне значення ($w_{U_j} = \text{true}$) при додатному значенні напруги j -го тиристора ($u_{T_j} \geq 0$); w_{α_j} – приймає істинне значення ($w_{\alpha_j} = \text{true}$) при $\alpha_p + \Delta\alpha \geq \alpha_{T_j} \geq \alpha_p$, де α_p – кут регулювання, $\Delta\alpha$ – ширина зони подачі імпульсів на відкривання вентилів, α_{T_j} – поточне значення кута тиристора; w_{K_j} – приймає істинне значення ($w_{K_j} = \text{true}$), якщо j -й тиристор запертий при ($K_j = 0$), де K_j – ознака стану j -го тиристора.

Вхідними даними для розрахунку електромагнітних процесів є каталожні параметри структурних елементів системи. Для електричної мережі такими даними є: E_M , R_M , L_M – амплітуда напруги, активний опір та індуктивність фаз мережі. Для основного явнополосного генератора та явнополосного генератора, що слугує збуджувачем до вхідних даних належать: L_{ad} – індуктивність, що відповідає реакції якоря по поздовжній осі d ; L_{aq} – індуктивність, що відповідає реакції якоря по поперечній осі q ; $L_{\sigma d}$, $L_{\sigma q}$ – індуктивності розсіювання обмотки статора по осях d та q відповідно; $L_{\sigma D}$, $L_{\sigma Q}$ – приведені до обмотки статора індуктивності розсіювання демпферної обмотки по осях d та q відповідно; L_0 – індуктивність нульової послідовності статора; $L_{\sigma f}$ – приведена до обмотки статора індуктивність розсіювання обмотки збудження; K_{if} – коефіцієнт приведення струму обмотки збудження до струму обмотки статора; P_0 – кількість пар полюсів. Крім цього, до вхідних даних явнополосних синхронних машин (ЯСГ) належать ще активні опори обмоток статора та ротора R_S , R_F , а також приведені до обмотки статора активні опори демпферної обмотки по поперечній та поздовжній осях R_D , R_Q відповідно. Для тиристорного випростовувача вхідними даними слугують: індуктивності та активні опори тиристорів L_Z , R_Z та L_W , R_W для запертого стану та стану провідності відповідно. Для джерела живлення постійної напруги (джерела живлення обмотки збудження збуджувача) вхідними даними слугують E_E , L_E , R_E , – електрорушійна сила, індуктивність та активний опір електричної вітки, якою моделюється джерело постійної напруги.

Слід зауважити, що математична модель трифазної мережі має подвійне використання. У першому випадку вона використовується за своїм прямим призначенням для режиму запуску турбіни і при цьому генератор працює у режимі двигуна. А в другому випадку трифазна електрична мережа використовується для моделювання активно-індуктивного навантаження, на яке працює генератор.

Крім каталожних даних структурних елементів системи до вхідних даних у межах цілої математичної моделі системи стартер-генератора належать початкові умови, що об'єднані у вектор інтегрованих змінних V та масив стану тиристорів K . Вектор інтегрованих змінних має таку структуру:

$$V = (i_{GS}, i_{Gf}, i_{GR}, \gamma_G, \omega_G, i_{FS}, i_{Ff}, i_{FR}, \gamma_F, \omega_F, i_K, i_A, i_M, i_E, t), \quad (6)$$

де $i_{GS} = (i_{GS1}, i_{GS2}, i_{GS3})$ – вектор струмів статора генератора, i_{Gf} – струм збудження генератора; $i_{GR} = (i_{Gd}, i_{Gq})$ – вектор приведених струмів демпферної обмотки по осях d і q відповідно; γ_G, ω_G – електричний кут повороту та механічна частота обертання ротора генератора; $i_{FS} = (i_{FS1}, i_{FS2}, i_{FS3})$ – вектор струмів статора збуджувача, i_{Ff} – струм збудження збуджувача; $i_{FR} = (i_{Fd}, i_{Fq})$ – вектор приведених струмів демпферної обмотки збуджувача по осях d і q відповідно; γ_F, ω_F – електричний кут повороту та механічна частота обертання ротора збуджувача; $i_K = (i_{T1}, i_{T2}, i_{T3})$ – вектор струмів катодної тиристорної групи; $i_A = (i_{T4}, i_{T5}, i_{T6})$ – вектор струмів анодної тиристорної групи; $i_M = (i_{M1}, i_{M2}, i_{M3})$ – вектор струмів електричної мережі; i_E – струм у колі джерела живлення обмотки збудження збуджувача; t – час інтегрування.

Масив стану вентилів K має розмірність 6, а числові значення його елементів приймають значення 0 для запертого стану та 1 для стану провідності. До вхідних даних належать також параметри системи керування комутатором (кут регулювання тиристорів випростовувача та ширина зони подачі імпульсів на відкриття тиристорів), кінцевий час інтегрування, крок інтегрування, а також дані керування виведенням результатів розрахунків тощо.

Алгоритм розрахунку електромагнітних процесів є таким:

- На підставі вхідних даних структурних елементів та вектора інтегрованих змінних V визначаються матриці коефіцієнтів та вектори вільних членів рівнянь зовнішніх віток структурних елементів (2), (3).
- На підставі матриць коефіцієнтів, векторів вільних членів рівнянь зовнішніх віток та матриць інцидентії структурних елементів формується та розв'язується система рівнянь електричної рівноваги (1). У результаті отримується вектор потенціалів незалежних вузлів ϕ (4).
- Визначається новий стан тиристорів випростовувача та на зворотному ході визначається вектор інтегрування pV , який є похідною вектора V за часом інтегрування.
- Одним із явних методів числового інтегрування визначається нове значення вектора V на поточному кроці інтегрування, яке слугує початковими умовами для наступного кроку інтегрування.
- Цей процес триває у межах часу інтегрування, визначеного початковими умовами та кінцевим часом інтегрування.

Результатами розрахунків є величини, що входять до вектора інтегрованих змінних V , та група інших величин як електричні напруги між вузлами електричної схеми у довільній комбінації, гармонічний склад електричних величин (струмів та напруг).

На підставі математичної моделі розроблено пакет програм мовою програмування FORTRAN. Для ілюстрації працездатності математичної моделі наводимо результати розрахунків електромагнітних процесів стартер-генератора потужністю 100 кВт під час його роботи у режимі неробочого ходу при номінальній швидкості обертання ротора та номінальному збудженні генератора.

На рис. 2 відображені миттєві значення $u_{GS} = (u_{GS1}, u_{GS2}, u_{GS3})$ – розрахункових залежностей фазних напруг статора ЯСГ. На рис. 3 відображені u_{Gf}, i_{Gf}, i_{Ff} – розрахункові залежності напруги, струму збудження генератора (криві 1,2) та струму збудження збуджувача (крива 3). На рис. 4 відображені $u_{FS} = (u_{FS1}, u_{FS2}, u_{FS3}) = (\varphi_7, \varphi_8, \varphi_9)$ – розрахункові залежності фазних напруг статора збуджувача ЯСГ. На рис. 5 відображені $i_{FS} = (i_{FS1}, i_{FS2}, i_{FS3})$ – розрахункові залежності струмів статора збуджувача.

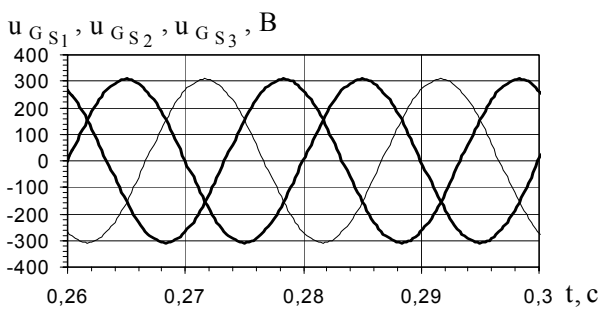


Рис. 2. $u_{GS1}, u_{GS2}, u_{GS3}$ – фазні напруги статора генератора

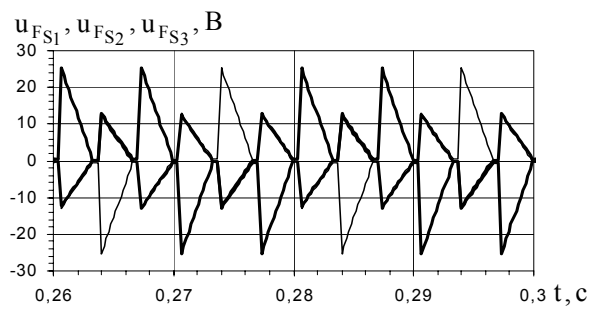


Рис. 4. $u_{FS1}, u_{FS2}, u_{FS3}$ – фазні напруги статора збуджувача

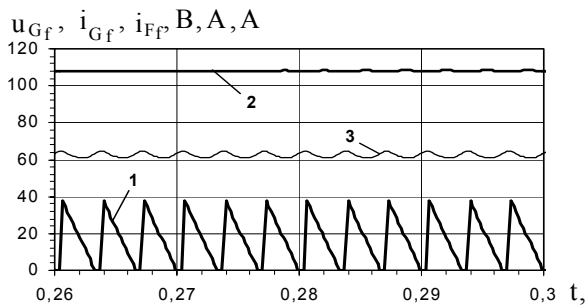


Рис. 3. u_{Gf}, i_{Gf}, i_{Ff} – напруга, струм збудження генератора (криві 1, 2) та струм збудження збуджувача (крива 3)

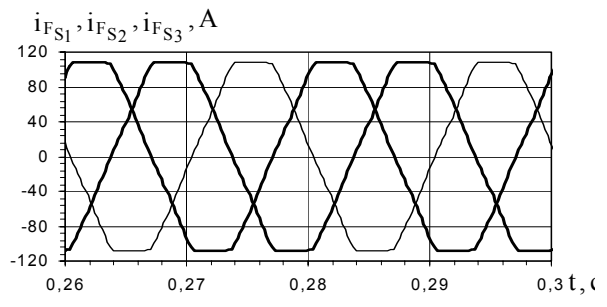


Рис. 5. $i_{FS1}, i_{FS2}, i_{FS3}$ – струми статора збуджувача

Рис. 6–9 ілюструють електричні процеси у вентильних групах тиристорного випростовувача. На рис. 6, 7 відображено розрахункові залежності $u_K = (u_{T1}, u_{T2}, u_{T3})$ – спаду напруг та $i_K = (i_{T1}, i_{T2}, i_{T3})$ – струмів тиристорів катодної групи. А на рис. 8, 9 відображено розрахункові залежності $u_A = (u_{T4}, u_{T5}, u_{T6}, \dots)$ – спаду напруг та $i_A = (i_{T4}, i_{T5}, i_{T6}, \dots)$ – струмів тиристорів анодної групи випростовувача.

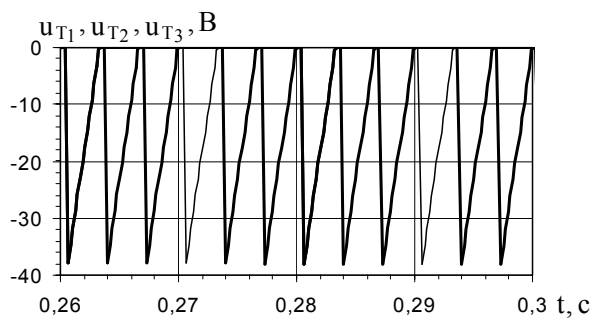


Рис. 6. u_{T1}, u_{T2}, u_{T3} – спад напруг на тиристорах катодної групи випростовувача

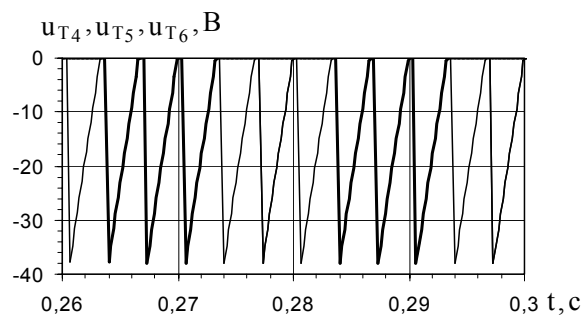


Рис. 8. u_{T4}, u_{T5}, u_{T6} – спад напруг на тиристорах анодної групи випростовувача

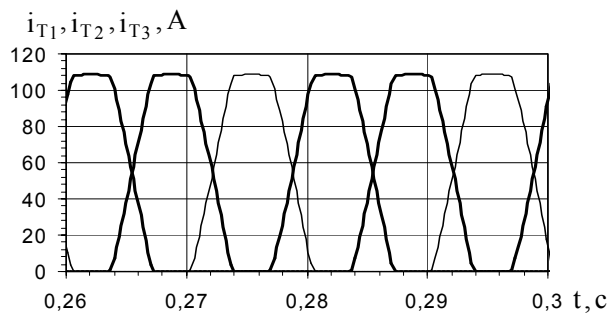


Рис. 7. i_{T1}, i_{T2}, i_{T3} – струми тиристорів катодної групи випростовувача

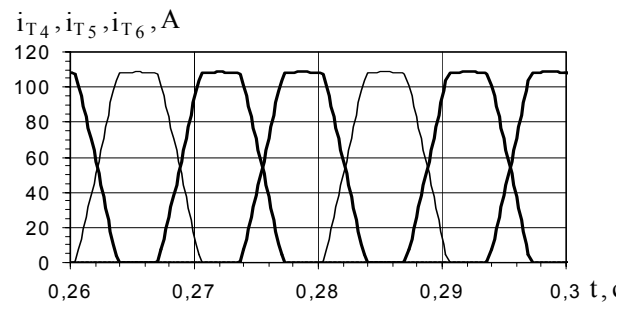


Рис. 9. i_{T4}, i_{T5}, i_{T6} – струми тиристорів анодної групи випростовувача

Слід зауважити, що характер кривих струмів та напруг контурів статора збуджувача істотно залежить від його параметрів.

У перспективу подальших досліджень входить докладний аналіз електромагнітних процесів С-Г у всіх без винятку режимах його роботи, включаючи етап запуску газової турбіни з переходом у основний режим роботи генератора та функціонування системи автоматичного стабілізування напруги.

Висновки. У запропонованій математичній моделі стартер-генератора схема силового електричного кола описана єдиною системою рівнянь електричної рівноваги, що надає змогу врахувати взаємний вплив структурних елементів системи і, як наслідок, забезпечити високий рівень адекватності математичної моделі загалом.

1. Електромагнітні та електромеханічні процеси, які відбуваються у синхронних машинах (генераторі та збуджувачі), описані з врахуванням електромагнітних зв'язків між електричними контурами для цих машин, що теж істотно підвищує рівень адекватності моделі стартер-генератора.

2. Запропонована математична модель дає змогу досліджувати поведінку стартер-генератора у характерних для практики режимах роботи (запуску турбіни при роботі генератора у режимі двигуна та основному режимі генерування електроенергії), враховуючи екстремальні ситуації, спричинені можливими короткими замиканнями, обривами електричних контурів, чи збоями у роботі системи керування тиристорним випростовувачем.

1. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. – Львов: Выща школа, 1986. – 164 с. 2. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.